



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi statistica avanzata per la determinazione dell'instabilità termo-acustica in combustori per turbogas sottoposti a variabilità del punto di lavoro

R. Camussi, T. Pagliaroli, G. Troiani

ANALISI STATISTICA AVANZATA PER LA DETERMINAZIONE DELL'INSTABILITÀ TERMO-ACUSTICA IN COMBUSTORI PER TURBOGAS SOTTOPOSTI A VARIABILITÀ DEL PUNTO DI LAVORO

Roberto Camussi, Tiziano Pagliaroli (Università degli studi di Roma Tre)
G. Troiani (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di Energia Elettrica e Protezione dell'Ambiente

Progetto: Cattura e sequestro della CO₂ prodotta da combustibili fossili

Obiettivo: Ampliamento del range operativo di sistemi turbogas sottoposti a variabilità del carico e della composizione del combustibile

Responsabile del Progetto: Ing. Stefano Giammartini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Caratterizzazione sperimentale di bruciatori di ultima generazione"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Guido Troiani

Responsabile scientifico Università degli studi Roma TRE: Prof. Roberto Camussi

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	5
3 CONCLUSIONI.....	10
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	10

Sommario

Il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato in data 2 agosto 2010 un Accordo di Programma in base al quale è concesso il contributo finanziario per l'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale.

Il presente allegato tecnico si riferisce al Piano Annuale di Realizzazione 2014, per quanto attiene all'Area "Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente", Progetto B.2 (Cattura ed il sequestro della CO₂ prodotta da combustibili fossili), linea di attività b (Ampliamento del range operativo di sistemi turbogas sottoposti a variabilità del carico e della composizione del combustibile –Simulazione di instabilità termo-acustiche).

Nell'ambito del presente quadro di ricerca, il Dipartimento di Ingegneria (nel seguito DING) verrà coinvolto nell'attività di diagnostica dei processi di combustione che si realizzano nei combustori per turbogas di media scala. In particolare il DING si occuperà del post-processing dei dati acquisiti dalla sensoristica installa sull'impianto COMET disponibile all'ENEA. Le tecniche di analisi impiegate saranno descritte di seguito nella presente relazione.

1 Introduzione

In accordo con questa linea programmatica di ricerca è stata ideata e sviluppata una metodologia operativa per l'identificazione dell'instabilità di tipo termo-acustico, fenomeno estremamente dannoso non solo per la stabilità del processo di combustione, ma anche per l'integrità stessa dell'intero combustore.

Il lavoro si basa sull'analisi statistica dei segnali acquisiti tramite un foto-diodo capace di registrare le emissioni luminose (chemiluminescenza) di una fiamma.

Sebbene le prove sperimentali fossero state inizialmente preventivate sull'impianto COMET, un combustore capace di lavorare con un bruciatore di tipo Trapped Vortex, a causa di lavori di manutenzione straordinaria, i dati sperimentali sono stati presi su un altro combustore, sempre di tipo Trapped Vortex.

La geometria del combustore è tale da favorire un ricircolo di fluido di grande scala, idealmente grande quanto le dimensioni massime della camera di combustione, ed intrappolare al suo interno il fronte di fiamma, il quale sotto opportune condizioni di diluizione con i propri prodotti di combustione, transisce da uno stato di combustione di superficie ad una combustione di tipo volumetrica. Il risultato finale è una considerevole diminuzione e una omogeneizzazione spaziale delle temperature a tutto vantaggio dell'abbattimento degli ossidi di azoto NOx.

Questo tipo di geometrie tuttavia, sono soggette a meccanismi di instabilità in cui oscillazioni del flusso inducono vibrazioni meccaniche, rumore, aumento del trasferimento di calore alle pareti del combustore e incremento delle emissioni inquinanti. Tali instabilità sono note con il nome di instabilità termo-acustiche in quanto vi è una mutua interazione e amplificazione tra onde acustiche e rilascio di calore.

Nell'ambito del presente quadro di ricerca, il DING ha sviluppato una tecnica innovativa per l'identificazione di fenomeni dell'instabilità nelle fiamme.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Analisi dei dati acquisiti su impianto TVC

Poiché l'impianto COMET, durante l'attività di ricerca è stato soggetto a manutenzione straordinaria, l'ENEA a proposto di testare la tecnica innovativa di analisi dati su un altro impianto di pari interesse. L'impianto selezionato a tale proposito è il Trapped Vortex precedentemente largamente caratterizzato sia in condizioni reattive [4] che non reattive [5]. In particolare è stato acquisito il segnale di energia radiante generato dal processo di combustione disponendo una sensore ODC in prossimità dell'accesso ottico (v. [Figura 1](#)).

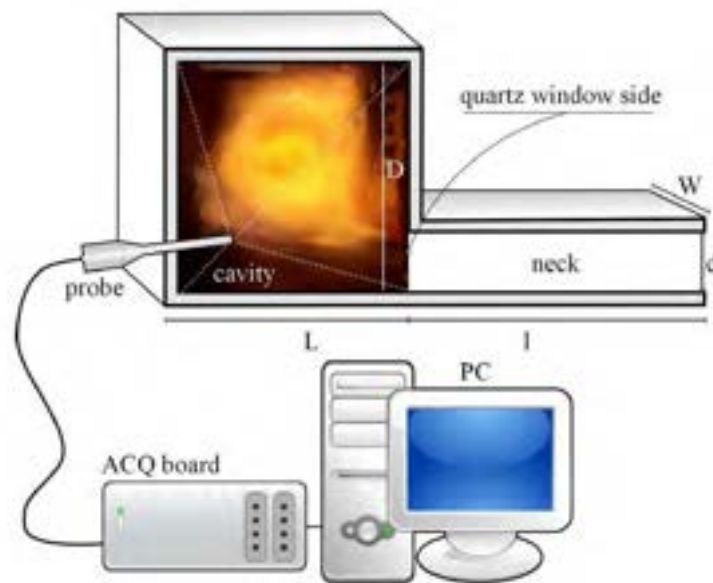


Figura 1. Sketch del setup sperimentale.

Sono state condotte numerose prove sperimentali variando potenza e rapporto di equivalenza dell'impianto. In questa sezione, viene presentata una sintesi dell'analisi dati, raccogliendo i risultati maggiormente significativi ottenuti dall'analisi. Nella Tabella 1 sono elencati i valori assunti dalle variabili per ogni punto di funzionamento dell'impianto. I 10 segnali analizzati sono riferiti a dei punti di funzionamento dell'impianto a potenza costante, facendo variare il rapporto di equivalenza, lo scopo è di portare l'impianto verso una condizione d'instabilità che determini l'estinzione del processo.

Tabella 1 Test matrix

Cond.	$\dot{m}_{CH_4} (Nm^3/h)$	$\dot{m}_{air} (Nm^3/h)$	Φ_{cav}
1	7.9	31	1.24
2	7.9	43.9	1.13
3	7.9	53	1.05
4	7.9	63	0.98
5	7.9	70	0.92
6	7.8	77.5	0.88
7	7.8	86.5	0.84
8	7.9	97	0.80
9	7.9	120	0.72
10	7.9	132	0.64

Per la condizione a rapporto di equivalenza pari a 0.72 viene mostrato il segnale di energia radiante normalizzato in Figura 2.

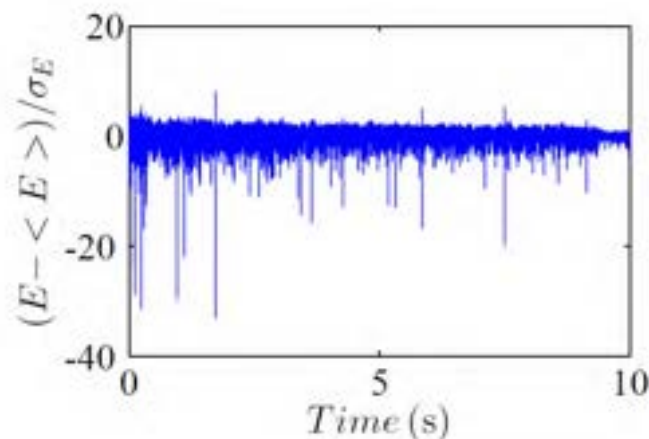


Figura 2. Segnale di energia radiante normalizzato campionato per $\varphi_{cav}=0.72$.

La normalizzazione è volta ad ottenere un segnale a media nulla e deviazione standard unitaria. Il segnale campionato presenta numerosi drop. In accordo con la letteratura [1], gli eventi identificabili, nella time history dell'energia radiante, come picchi verso il basso, possono essere imputabili ad estinzioni e riaccensioni del processo come schematizzato nella Figura 3

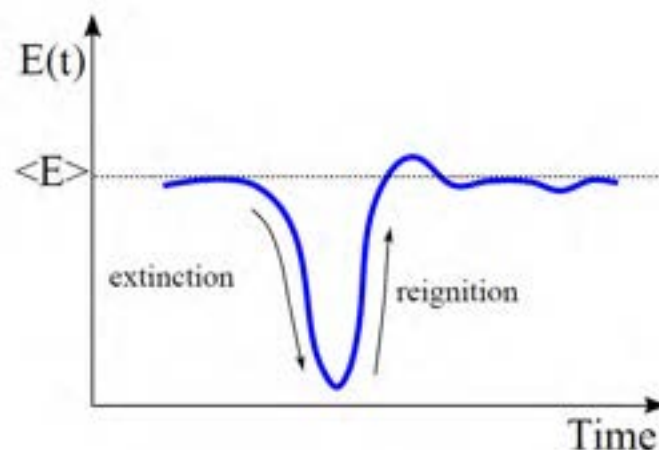


Figura 3. Schematizzazione della firma di energia radiante associata ad estinzioni localizzate.

Con la finalità di rendere le informazioni ottenuti più chiare possibile abbiamo concentrato la nostra attenzione su due casi: un primo caso a $\varphi_{cav}=1.2$ (miscela grassa) ed il secondo a $\varphi_{cav}=0.6$ (miscela magra).

Le immagini relative ai processi corrispondenti ai rapporti di equivalenza suddetti sono riportate in Figura 4.

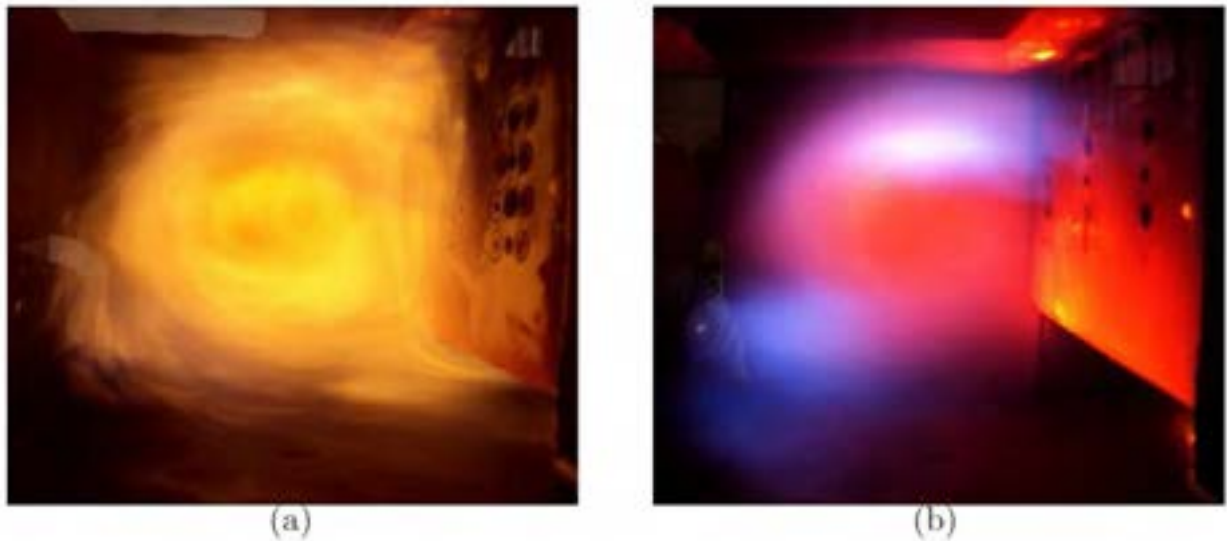


Figura 4. (a) immagine della fiamma nello spettro del visibile ottenuta in condizioni di miscela grassa; (b) immagine della fiamma ottenuta in condizioni di miscela magra.

Dei segnali corrispondenti alle due condizioni sono state calcolate le probability density function (PDF). Le PDF dei due segnali, Figura 5, sono fortemente asimmetriche come emerge dal confronto con la distribuzione normale. L'asimmetria è dovuta alla presenza di eventi a elevata energia [4].

Tali eventi sono detti eventi rari. Con la finalità di investigare la natura di questi eventi ci siamo affidati ad una tecnica consolidata dell'analisi caotica: la rappresentazione del segnale nello spazio delle pseudo-fasi. La dimensione di questo spazio è stata determinata mediante il teorema dell'embedding ($m=3$) mentre il periodo T è stato ottenuto mediante il calcolo dell'autocorrelazione del segnale.

La presenza di componenti del segnale ad elevata energia è confermata dall'analisi caotica. Nello specifico, si possono osservare delle orbite nello spazio delle pseudo-fasi che indicano la presenza di eventi ad alta energia, tali eventi mostrano inoltre una coerenza che si manifesta nella formazione di orbite nello spazio delle pseudo-fasi (v. Figura 6).

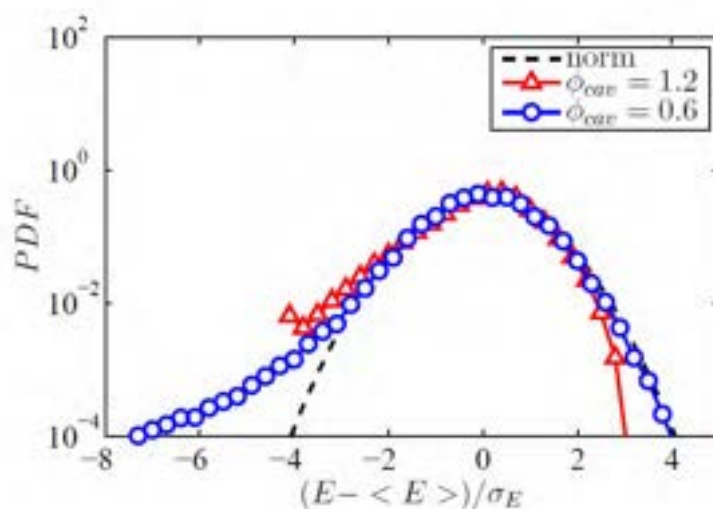


Figura 5. PDF del segnale di energia radiante.

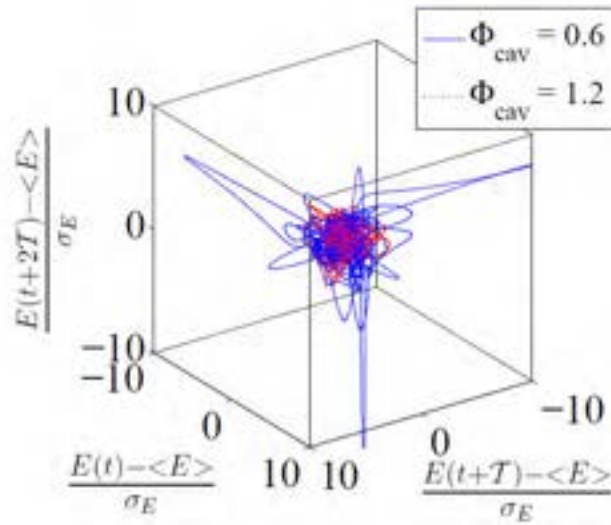


Figura 6. Spazio delle pseudo-fasi del segnale di energia radiante.

Con la finalità di identificare dal punto di vista statistico questi eventi, è stato applicato un metodo di auto-condizionamento dei segnali, basato sulla trasformata wavelet. I dettagli matematici del metodo impiegato sono riportati in [2]. La trasformata wavelet permette l'identificazione delle strutture coerenti nei segnali mediante una rappresentazione tempo frequenza detta scalogramma.

La procedura di trattamento dei dati adottato per lo svolgimento dell'attività d'investigazione della instabilità dei combustori trapped vortex è riportata di seguito.

Lo scopo della procedura è quello di estrarre dai segnali i contributi più energetici.

La trasformata wavelet è ottenuta mediante proiezione del segnale sulla una base compatta, $\Psi(t)$, i.e. localizzata nel tempo.

Formalmente la trasformata di un segnale di fluttuazione di pressione $p'(t)$ alla scala r è data dalla seguente espressione.

$$w(r, t) = C_{\Psi}^{-1/2} r^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi^* \left(\frac{t-\tau}{r} \right) p(\tau) d\tau \quad (2-1)$$

Dove C_{Ψ} è un coefficiente legato al valore medio $\Psi(t)$.

Il metodo d'identificazione degli eventi impiegato nella presente attività è il Local Intermittency Measure (LIM) definito come segue:

$$LIM(r, t) = \frac{w(r, t)^2}{\langle w(r, t)^2 \rangle_t} \quad (2-2)$$

Dove l'operatore $\langle \bullet \rangle_t$ indica una media temporale.

L'identificazione delle strutture coerenti è basata sull'idea che il passaggio di strutture coerenti ad una certa scala caratteristica r e ad un istante t_i induca un incremento dell'energia a quella scala. Pertanto, applicando un'opportuna soglia al LIM, pari a S , al passaggio di una struttura coerente la condizione $LIM(r, t_i) > S$ sarà verificata.

Il metodo di auto-condizionamento permette di ottenere la firma media associata agli eventi ad alta coerenza ed energia. Mediante la tecnica di analisi sviluppata è possibile calcolare il riferimento temporale di ciascun evento ed il ritardo temporale (τ) tra un evento e il suo successivo. Come mostrato in Figura 7 (a) riducendo il rapporto di equivalenza la struttura degli eventi coerenti varia in modo significativo. Per miscela grassa l'evento è un semplice picco verso il basso di energia radiante. Riducendo il rapporto di equivalenza, ottenendo una miscela magra, l'evento assume la forma di un wavepacket: un treno d'onda fortemente localizzato dal punto di vista temporale. Le oscillazioni presenti in questo evento inducono a pensare che in una finestra temporale ridotta si manifestino estinzioni seguite da accensioni che si ripetono, amplificano e successivamente si smorzano, probabilmente legate a dei meccanismi d'instabilità intrinseca del processo. Si può inoltre notare in Figura 7 (b) che la Pdf dei tempi di ritardo passa da lineare (per miscela grassa) a piccata, intorno ad un valore modale (miscela magra). Dunque gli eventi mostrati nella Figura 7 (a) cambiano natura: da indipendenti temporalmente (intermittenza) a maggiormente periodici (periodicità).

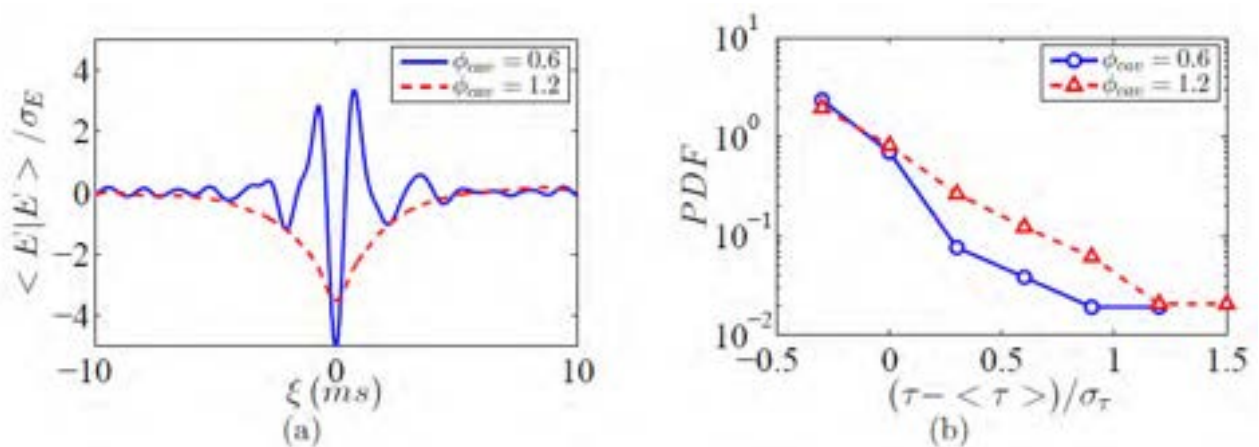


Figura 7. (a) eventi medi e coerenti presenti nel segnale di energia radiante in due condizioni di funzionamento dell'impianto ; (b) Pdf dei tempi di ritardo tra un evento coerente e il successivo, calcolate per due valori del rapporto di equivalenza.

La metodologia, finora sviluppata permette d'identificare firme nei segnali di energia radiante con un basso costo computazionale, sarà dunque impiegata nell'ambito della diagnostica dell'instabilità di combustione fornendo nuove ed interessanti informazioni. A tal proposito pensiamo che la tecnica sia particolarmente indicata all'identificazione dei fenomeni precursori dell'instabilità nelle fiamme e possa fornire un efficiente dato per eventuali loop di controllo.

3 Conclusioni

Nell'ambito del presente lavoro è stato implementato un algoritmo per l'identificazione dei precursori dell'estinzione del fronte di fiamma. In particolare abbiamo verificato che riducendo il rapporto di equivalenza il TVC è soggetto a Lean Blow Out che è preceduto da fenomeni precursori di natura oscillatoria identificati dalla tecnica di auto-condizionamento sviluppata.

La tecnica presenta un basso costo computazionale e risulta essere particolarmente indicata per la diagnostica real-time mediante sensore ODC.

4 Riferimenti bibliografici

1. N. Suraj, T. Lieuwen, "Acoustic detection of blowout in premixed flames", *Journal of Propulsion and Power*, 21.1, 2005, 32-39.
2. T. Pagliaroli, R. Camussi, E. Giacomazzi, E. Giulietti, "Velocity Measurement of Particles Ejected from a Small-Size Solid Rocket Motor", *Journal of Propulsion and Power*, 2015: 1-8.
3. S. Kartheekyan, S. R. Chakravarthy. "An experimental investigation of an acoustically excited laminar premixed flame." *Combustion and flame* 146.3 (2006): 513-529.
4. T. Pagliaroli, R. Camussi, A. Di Marco, C. Stringola, E. Giulietti, E. Giacomazzi, "COMBUSTION ACOUSTIC COUPLING IN TRAPPED VORTEX COMBUSTOR", 9th MCS, Rhodes, Greece.
5. T. Pagliaroli, R. Camussi, "Wall pressure fluctuations in rectangular partial enclosures." *Journal of Sound and Vibration* 341 (2015): 116-137.

Breve Curriculum del responsabile scientifico del gruppo proponente

Roberto Camussi si è laureato con lode in Ingegneria Aeronautica presso l'Università "La Sapienza" di Roma nel 1991. Nel 1995 ha completato il Dottorato di Ricerca in Meccanica Teorica ed Applicata presso la stessa Università e, nello stesso anno, ha vinto un posto da Ricercatore presso l'Università Roma Tre. Dal 2002 è Professore Associato presso la facoltà di Ingegneria dell'Università Roma Tre. Dal 2012 è Professore Straordinario presso l'Università Roma Tre.

Nel periodo 1994-1995 ha svolto attività di ricerca presso l'Ecole Normale di Lione. Dal 1994 ad oggi ha partecipato a numerose conferenze Nazionali ed Internazionali, come Chairman in alcune sessioni. E' stato organizzatore di workshop, conferenze e scuole internazionali.

E' stato invitato a tenere numerosi seminari presso Università e centri di ricerca italiani ed esteri.

E' stato invitato a contribuire su riviste internazionali con pubblicazioni di review ad invito. E' Referee di numerose prestigiose riviste internazionali (ad esempio. *Journal of Fluid Mechanics*, *Physics of Fluids*, *Experiments in Fluids*).

E' Referee della *National Science Foundation* degli USA, del sistema *EPSRC* – UK Engineering and Physical Science Research Council, del sistema *e-GAP2* della Royal Society, London (UK).

Fa parte del Consiglio Direttivo dell'associazione AIVELA (Associazione Italiana di Velocimetria Laser). E' il rappresentante dell'AIDAA (Associazione Italiana di Aeronautica ed Astronautica) presso l'*Aeroacoustic Specialists Committee* della CEAS (Council of European Aerospace Society).

Ha avuto ruolo di responsabilità e di collaborazione in numerosi contratti e convenzioni di ricerca finanziati dalla comunità europea (nel 6° e 7° programma quadro, CleanSky, H2020 CleanSky2), da enti pubblici (quali MUR, CNR, Regione Lazio), da centri di ricerca (quali ASI, CIRA, ENEA, AVIO) e da società private (quali ad esempio ALENIA, MBDA, ITALFERR).

Insegna presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università Roma Tre, tenendo un corso di fluidodinamica nella laurea in Ingegneria Meccanica, e corsi di Aerodinamica e Propulsione, nell'ambito della laurea magistrale di Ingegneria Aeronautica. Tiene corsi nel settore dell'aeroacustica agli studenti della sezione di Ingegneria Meccanica e Industriale della Scuola Dottorale di Ingegneria dell'Università Roma Tre, del cui Collegio dei Docenti fa parte. E' docente guida di diversi dottorandi, di numerosi laureandi di primo e secondo livello, di numerosi stagisti italiani e stranieri. Ha fatto parte di commissioni per concorsi a posti di Ricercatore, di Dottorato, di assegni di ricerca ed ha fatto parte di commissioni per l'esame finale di Dottorato sia in Italia che presso Università straniere.

Ha lavorato principalmente nel settore della fluidodinamica sperimentale con studi nel campo dei flussi turbolenti, dell'aeroacustica ed aerodinamica di flussi di parete, dell'aeroacustica ed aerodinamica di getti, della combustione turbolenta e nello sviluppo di metodologie avanzate per analisi di segnali.

Le ricerche svolte hanno portato alla realizzazione di oltre 150 lavori scientifici pubblicati su riviste scientifiche internazionali e atti di conferenze nazionali o internazionali. Per brevità si riportano nel seguito solo gli articoli pubblicati su riviste internazionali, con referaggio.

1. R. CAMUSSI, G. GUJ, "On the Extended Self Similarity and the Form-Function", **Meccanica**, vol. 30, pp. 719-725, 1995.
2. R. CAMUSSI, D. BARBAGALLO, G. GUJ, F. STELLA: "Transverse and longitudinal scaling laws in homogeneous and non-homogeneous low Re_λ turbulence", **Lecture notes in Physics**, ed. Springer-Verlag, pp. 171-178, 1995.
3. R. CAMUSSI, G. GUJ: "Experimental analysis of scaling laws in low Re grid-generated turbulence", **Experiments in fluids**, vol. 20, pp. 199-209, 1996.
4. R. CAMUSSI, G. GUJ: "Extended Self Similarity in Anisotropic Grid-generated Turbulent flow", **European Journal of Mechanics /B**, vol. 15(2), pp. 257-273, 1996.
5. R. CAMUSSI, D. BARBAGALLO, G. GUJ, F. STELLA: "Transverse and longitudinal scaling laws in non-homogeneous low Re Turbulence", **Physics of Fluids**, vol. 8 (5), pp. 1181-1191, 1996.
6. R. CAMUSSI, C. BAUDET, R. BENZI, S. CILIBERTO, "Scaling properties of the velocity increments correlation function", **Physics of Fluids**, vol. 8 (6), pp. 1686-1688, 1996.
7. R. CAMUSSI ed altri autori, "Structure functions in turbulence in various flow configurations, at Reynolds number between 30 and 5000, using Extended Self Similarity", **Europhysics Letters**, vol. 34 (6), pp. 411-416, 1996.
8. R. CAMUSSI, S. CILIBERTO, R. BENZI, C. BAUDET, "Statistical uncertainty in the analysis of structure functions in turbulence", **Physical Review E**, vol. 4, pp. 100-103, 1996.
9. R. CAMUSSI, G. GUJ, "Wavelet decomposition and coherent structures eduction of low Re_η turbulent hot wire signals", **Flow, Turbulence and Combustion**, Vol. 57, pp. 195-209, 1996.
10. R. CAMUSSI, G. GUJ, "Orthonormal wavelet decomposition of turbulent flows: intermittency and coherent structures", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 348, pp. 177-199, 1997.
11. R. CAMUSSI, R. BENZI, "Hierarchy of transverse structure functions", **Physics of Fluids**, Vol. 9 (2), pp. 257-259, 1997.
12. R. VERZICCO, R. CAMUSSI, "Transitional regimes of low-Prandtl thermal convection in a cylindrical cell", **Physics of Fluids**, Vol. 9 (6), pp. 1287-1295, 1997.
13. R. CAMUSSI, D. BARBAGALLO, G. GUJ, "Experimental analysis of transverse intermittency in a turbulent jet flow", **Experiments in Fluids**, Vol. 22, pp. 268-270, 1997.
14. R. CAMUSSI, S. CILIBERTO, C. BAUDET, "Experimental study of the evolution of a velocity perturbation in fully developed turbulence", **Physical Review E**, Vol. 56 (5), pp. 6181-6184, 1997.
15. R. CAMUSSI, R. VERZICCO, "Convective turbulence in mercury: scaling laws and spectra", **Physics of Fluids**, Vol. 10, pp. 516-527, 1998.
16. G. GUJ, R. CAMUSSI, "Statistical analysis of local turbulent energy fluctuations", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 382, pp. 1-26, 1999.
17. R. VERZICCO, R. CAMUSSI, "Prandtl number effects in convective turbulence", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 383, pp. 55-73, 1999.
18. V. NINNI, R. CAMUSSI, G. GUJ, "Statistical study of anisotropic anomalous behavior of a cylinder wake", **Experiments in Fluids**, Vol. 26, pp. 161-168, 1999.
19. R. CAMUSSI, G. GUJ, "Experimental analysis of intermittent coherent structures in the near field of a high Re turbulent jet flow", **Physics of Fluids**, Vol. 11 (2), pp. 423-431, 1999.
20. R. CAMUSSI, A. STELLA, T. KOWALEWSKI, G. GUJ, "Large-scale structures forming in a cross-flow: Particle Image Velocimetry conditional analysis", **Machine, Graphics and Vision**, Vol. 8, pp. 579-596, 1999 (also presented at the conference "EUROMECH 406: Image Processing Methods in Applied Mechanics", Varsavia, 6-9 Maggio, 1999).
21. R. VERZICCO, R. CAMUSSI, "On thermally-driven convection in cylindrical cells of unitary aspect ratio", (invited) **Recent Research Developments in Fluid Dynamics**, Vol. 2, pp. 63-85, 1999

22. M. ONORATO, R. CAMUSSI, G. IUSO, "Anomalous scaling and bursting process in an experimental turbulent channel flow", **Physical Review E**, Vol. 61 (2), pp. 1447-1454, 2000.
23. R. CAMUSSI, R. VERZICCO, "Anomalous scaling exponents and coherent structures in high Re fluid turbulence", **Physics of Fluids**, Vol. 12 (3), pp. 676-687, 2000.
24. V. NIKORA, D. GORING, R. CAMUSSI, "Intermittency and interrelationships between turbulence scaling exponents: phase-randomisation tests", **Physics of Fluids**, Vol. 13 (5), pp. 1404-1414, 2001.
25. R. CAMUSSI, G. GUJ, "Wavelet analysis of turbulence data: coherent structures identification and intermittency", **Non Linear Instability Analysis**, Vol. II, L. Debnath & D.N. Rihani eds., Wit Press, Computational Mechanics Publications, pp 179-220, 2001 (invited).
26. R. CAMUSSI, "Wavelets", **2001 Yearbook of science and technology**, *Encyclopedia of Science and Technology*, McGraw-Hill ed., 2001 (invited).
27. R. CAMUSSI, "Coherent structures identification from Wavelet analysis of PIV bidimensional velocity fields", **Experiments in Fluids**, Vol. 32, pp. 76-86, 2002.
28. R. CAMUSSI, G. GUJ, A. STELLA, "Experimental study of a jet in a cross-flow at very low Reynolds number", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 454, pp. 113-144, 2002.
29. R. VERZICCO, R. CAMUSSI, "Structure function exponents and pdf of the velocity difference in turbulence", **Physics of Fluids**, Vol. 14, pp. 906-909, 2002.
30. G. GUJ, M. CARLEY, R. CAMUSSI e A. RAGNI, "Acoustic identification of coherent structures in a turbulent jet", **Journal of Sound and Vibrations**, Vol. 259, pp. 1037 – 1065, 2003.
31. R. VERZICCO, R. CAMUSSI, "Numerical experiments on strongly turbulent thermal convection in a slender cylindrical cell", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 477, pp. 19-49, 2003.
32. R. CAMUSSI, R. VERZICCO, "Temporal statistics in high Rayleigh number convective turbulence", **European Journal of Mechanics – B/Fluids**, Vol. 23, pp. 427-442, 2004.
33. R. CAMUSSI, M. FELLI, "Far field pressure fluctuations and coherent structures in a low Mach number turbulent jet flow", **International Journal of Aeroacoustics**, Vol. 3, pp. 347-360, 2004.
34. R. CAMUSSI, G. GUJ, A. RAGNI, "Wall pressure fluctuations induced by turbulent boundary layers over surface discontinuities", **Journal of Sound and Vibration**, Vol. 294, pp. 177-204, 2006.
35. R. CAMUSSI, DI FELICE F., "Statistical properties of vortical structures with spanwise vorticity in zero pressure gradient turbulent boundary layers", **Physics of Fluids**, Vol. 18, pp. 035108-1 035108-16, 2006.
36. R. CAMUSSI, G. GUJ, A. DI MARCO, A. RAGNI, "Propagation of wall pressure perturbations in a large aspect-ratio shallow cavity", **Experiments in Fluids**, Vol. 40, pp. 612-620, 2006.
37. M. FELLI, F. DI FELICE, G. GUJ, R. CAMUSSI, "Analysis of the Propeller wake evolution by pressure and velocity phase measurements", **Experiments in Fluids**, Vol. 41, pp. 441-451, 2006.
38. R. CAMUSSI, G. GUJ, B. IMPERATORE, A. PIZZICAROLI, D. PERIGO, "Wall pressure fluctuations induced by transonic boundary layers on a launcher model", **Aerospace Science and Technology**, Vol. 11, pp. 349-359, 2007.
39. M. FELLI, G. GUJ, R. CAMUSSI, "Effect of the number of blades on propeller wake evolution", **Experiments in Fluids**, Vol. 44, pp. 409-418, 2008.
40. R. CAMUSSI, G. GUJ, F. TOMASSI, R. SISTO, "Effect of air injection on the far field pressure radiated from a jet at subsonic Mach numbers", **International Journal of Aeroacoustics**, Vol. 7, pp. 69-82, 2008.
41. R. CAMUSSI, M. FELLI, F. PEREIRA, G. ALOISIO, A. DI MARCO, "Statistical Properties of Wall Pressure Fluctuations Over a Forward Facing Step", **Physics of Fluids**, Vol. 20, pp. 075113-1 075113-13, 2008.
42. R. CAMUSSI, G. ROBERT, M. C. JACOB, "Cross-Wavelet analysis of wall pressure fluctuations beneath incompressible turbulent boundary layers", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 617, pp. 11-30, 2008.
43. M. FELLI, R. CAMUSSI, G. GUJ, "Experimental analysis of the flow field around a propeller-rudder configuration", **Experiments in Fluids**, Vol. 46, pp. 147-164, 2009.
44. M. C. JACOB, J. GRILLIAT, R. CAMUSSI, G. CAPUTI GENNARO, "Aeroacoustic investigation of a single airfoil tip leakage flow", **International Journal of Aeroacoustics**, Vol. 9 (3), pp. 253-272, 2010.
45. R. CAMUSSI, M. JACOB, J. GRILLIAT, G. CAPUTI GENNARO, "Experimental study of a tip leakage flow: wavelet analysis of pressure fluctuations", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 660, pp. 87-113, 2010.

46. M. FELLI, R. CAMUSSI, "Experimental characterization of the tip vortex evolution in a propeller wake", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 682, pp. 5 – 53, 2011.
47. F.R. VERDUGO, A. GUITTON, R. CAMUSSI, "Experimental investigation of a cylindrical cavity in a low Mach number flow", **Journal of Fluids and Structures**, Vol. 28, pp. 1–19, 2012.
48. S. GRIZZI, R. CAMUSSI, "Wavelet analysis of Near-Field Pressure Fluctuations Generated by a Subsonic Jet", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 698, pp. 93-124, 2012.
49. A. DI MARCO, R. CAMUSSI, M. BERNARDINI, S. PIROZZOLI, "Wall pressure coherence in supersonic turbulent boundary layers", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 732, pp. 445-456, 2013.
50. R. CAMUSSI, S. GRIZZI, "Statistical analysis of the pressure field in the near region of a $M = 0.5$ circular jet", **International Journal of Aeroacoustics**, Vol. 13, pp. 169-182, 2014.
51. T.PAGLIAROLI, R.CAMUSSI, "Wall pressure fluctuations in rectangular partial enclosures", **Journal of Sound and Vibration**, Vol. 341, pp. 116-137, 2015.
52. A. DI MARCO, M. MANCINELLI AND R. CAMUSSI, "Pressure and velocity measurements of an incompressible moderate Reynolds number jet interacting with a tangential flat plate", **Journal of Fluid Mechanics**, Vol. 770, pp 247 – 272, 2015,
53. D. GRASSUCCI, R. CAMUSSI, P. JORDAN, S. GRIZZI, "Intermittency of the near pressure field induced by a compressible coaxial jet", **Experiments in Fluids** 56:23, 2015
54. T.PAGLIAROLI, R.CAMUSSI, E. GIACOMAZZI, E. GIULIETTI, "Velocity measurements of particles ejected from a small size solid rocket motor", **Journal of Propulsion and Power**, accepted for publication, 2015.

Contributi a invito:

55. R. CAMUSSI, D. BARBAGALLO, G. GUJ, F. STELLA: "Transverse and longitudinal scaling laws in homogeneous and non-homogeneous low Re_λ turbulence", **Lecture notes in Physics**, ed. Springer-Verlag, pp. 171-178, 1995.
56. R. CAMUSSI, G. GUJ, "Wavelet analysis of turbulence data: coherent structures identification and intermittency", **Non Linear Instability Analysis**, Vol. II, L. Debnath & D.N. Rihani eds., Wit Press, Computational Mechanics Publications, pp 179-220, 2001.
57. R. CAMUSSI, "Wavelets", **2001 Yearbook of science and technology**, *Encyclopedia of Science and Technology*, McGraw-Hill ed., 2001.
58. J. GRILLIAT, L. ZHOU, A. DELGADO, R. CAMUSSI, M. C. JACOB, "Applications of the wavelet theory on turbulent time signals: denoising and conditioning", **Developments in mechanical engineering**. Vol. 5. Eds. J.T. Cieslinski, J.A. Szymczyk, Gdansk: Gdan. Univ. Technol., 2012, pp. 59-64.
59. R. CAMUSSI, A. DI MARCO, "Boundary Layer Noise", in **Noise Sources in Turbulent Shear Flows: Fundamentals and Applications**, CISM Courses and Lectures 545, Springer, 2013.
60. R. CAMUSSI, A. DI MARCO, "Wall pressure fluctuations statistics: measurements and numerical simulations", in **Advanced post-processing of experimental and numerical data**, Von Karman Institute Lecture Series, Nov. 2013.
61. R. CAMUSSI, "Wavelet analysis and applications in aeroacoustics", in **Advanced post-processing of experimental and numerical data**, Von Karman Institute Lecture Series, Nov. 2013.
62. R. CAMUSSI, "Advanced analysis techniques (Wavelets, LSE, POD) for noise sources identification", in **Aeroengin Noise**, Von Karman Institute Lecture Series, Dec. 2014.
63. R. CAMUSSI, A. DI MARCO, "Wall pressure fluctuations induced by supersonic turbulent boundary layer", in *Flinovia – Flow Induced Noise and Vibration Issues and Aspects*, E. Ciappi, S. De Rosa, F. Franco, J.L. Gyader, S.A. Hambrics Eds, pp 67-90, Springer, 2015.